

*Vinciane Polus*

*Antoine Loucheur*

*Thomas Plennevaux*

# *Le Projet TéraMobile*

*Lycée Robespierre*

*PC\* 2002/2003*

## *Introduction*

*Les moyens actuels de protection contre la foudre (paratonnerre, para-foudre) ne sont pas fiables à 100%. C'est pourquoi un projet franco-allemand, appelé Teramobile, a été développé ayant notamment pour objectif le déclenchement et le guidage de la foudre grâce à un faisceau laser de très haute puissance. Ce projet, encore à l'état expérimental, implique la propagation non linéaire du faisceau laser dans l'atmosphère. Après avoir détaillé le système Teramobile, nous examinerons les principales caractéristiques de cette propagation pour développer enfin l'application au contrôle de la foudre.*

# *PLAN*

## I. Le système Téra-mobile

- A. Généralités
- B. La chaîne laser
  1. Vue d'ensemble
  2. Oscillateur
  3. Etireur d'onde
  4. Amplificateur
  5. Compresseur
- C. L'effet Chirp

## II. Propagation de l'impulsion générée, équilibre focalisation – défocalisation

- A. Autofocalisation par effet Kerr
- B. Phénomène impliqués dans la défocalisation
- C. Equilibre effet Kerr – ionisation

## III. Contrôle de la foudre et autres applications

- A. L'énergie d'ionisation
- B. Comparaison nature – Téra-mobile
  1. Déclenchement classique de la foudre
  2. Déclenchement artificiel de la foudre par le Téra-mobile
- C. Enjeux et limites
  1. En pratique
  2. Les limites du projet

## I. Le système Teramobile

### A. Généralités

Le système Teramobile est constitué d'une chaîne laser femtoseconde térawatt logé dans un conteneur de dimensions standards. Il peut ainsi être transporté facilement afin de réaliser des campagnes expérimentales.

Le TéraMobile est constitué de deux pièces isolées : une salle de contrôle qui sert de sas et le laboratoire qui contient tous les instruments optiques. Le rôle du sas est très important puisqu'il assure le contrôle thermique et garantit une grande propreté au laboratoire et donc aux optiques.

Le laboratoire contient en plus du système laser les alimentations électriques puisqu'il faut rappeler que la mobilité du TéraMobile implique que les scientifiques aient tout leur matériel avec eux.

On peut parler rapidement de la sécurité oculaire puisque ce fut une de nos questions lors de notre séjour à l'université de Lyon 1. Un système de sécurité contrôle le fonctionnement du laser et peut à tout moment bloquer le faisceau sur ordre de détecteurs adaptés pour les expériences. Il est donc possible de repérer un mouvement et même le passage d'un avion.

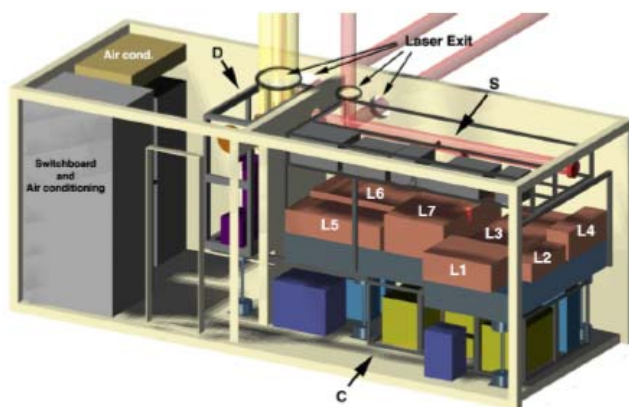


Figure 1: Schéma de l'aménagement du laboratoire mobile. Optique d'émission (S), oscillateur (L1), étireur (L2), amplificateurs (L3 et L5) lasers de pompe (L4 et L6), compresseur (L7), compartiment isolé pour les alimentations (C), détection Lidar (D)

Longueur de bande	793 nm
Largeur de bande	16 nm
Energie par impulsion	350 mJ
Durée d'une impulsion	70 fs à 600 fs
Puissance crête	5 TW
Fréquence	10 Hz
Diamètre du faisceau	50 mm
Réglage du chirp	70 fs à 2 ps, chirp positif ou négatif
Stabilité de l'énergie	2,5 % RMS sur 400 tirs
Dimensions	3,5 x 2,2 m

Tableau 1 : Performances du laser TéraMobile

## B. La chaîne LASER

### 1. Vue d'ensemble

La chaîne laser comprend quatre éléments caractéristiques : un oscillateur, un étireur d'onde, un amplificateur, et un compresseur. L'oscillateur crée l'impulsion qui avant et après avoir été amplifiée nécessite d'être respectivement étirée et compressée. Le schéma ci-dessous montre l'évolution de la durée temporelle et de la puissance de l'impulsion. Nous allons donc présenter les différentes parties du laser en nous attachant plus sur l'étireur et le compresseur.

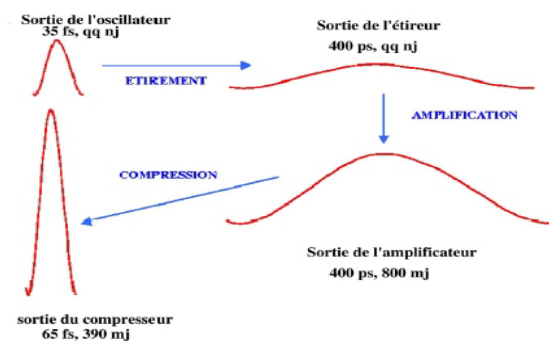


Figure 2 Evolution de l'onde à travers les différents composants

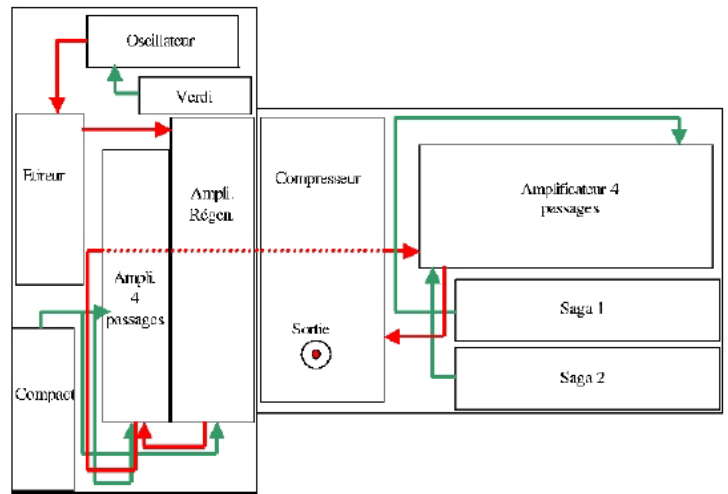


Figure 3 Schéma simplifié de la chaîne femtoseconde. Rouge : Trajet d'impulsion fs, Vert : faisceau de pompe

### 2. Oscillateur

L'oscillateur utilisé dans le système Teramobile produit une impulsion d'environ 30 fs de durée et de 32 nm de largeur spectrale centrée sur 792nm. En sortie de l'oscillateur la puissance moyenne est de 550 mW avec une fréquence de 76 MHz. La taille du faisceau est alors de 1 mm de diamètre en sortie de l'oscillateur. Le faisceau est alors étiré avant d'être amplifié.

### 3. L'étireur d'onde

Le rôle de l'étireur est d'allonger temporellement les impulsions en faisant parcourir aux différentes longueurs d'onde des chemins optiques différents. On utilise pour cela des systèmes dispersifs tels que les réseaux.

Pour une longueur d'onde donnée, l'angle de réflexion  $\theta$  sur le réseau est défini par :

$$\sin \theta = \sin i + \frac{\lambda}{d}, \text{ soit à l'ordre 1 : } \theta = \sin i + \frac{\lambda}{d} \text{ où } i \text{ est l'angle d'incidence, donc l'angle}$$

de réflexion est proportionnel à la longueur d'onde.

Cet étirement permet ainsi de diminuer l'intensité crête et donc de pouvoir amplifier les impulsions sans endommager les optiques.

Le dièdre présent sur le schéma sert à décaler l'onde en hauteur afin de pouvoir exploiter simplement le faisceau émergent. De plus, il permet au faisceau de repasser sur les réseaux empêchant ainsi le décalage spectral. Les deux longueurs d'onde  $\lambda_0$  et  $\lambda_1$  (avec  $\lambda_0 < \lambda_1$ ) ont un angle de réflexion différent et on peut voir que le trajet de  $\lambda_0$  est plus long que celui de  $\lambda_1$ .

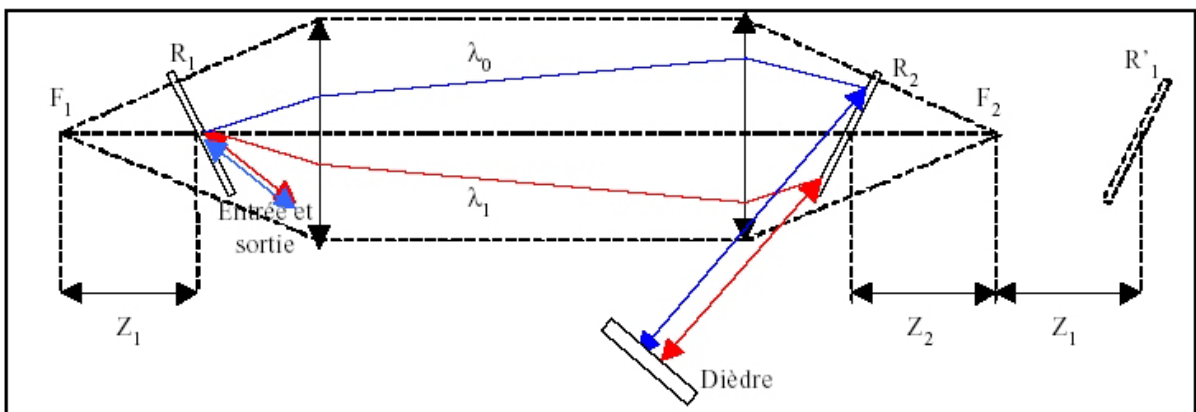


Figure 4 Schéma de l'étireur du Téra-mobile pour un doublet d'ondes de longueurs d'onde différentes.

#### 4. L'amplificateur

Il permet d'amplifier les impulsions sans changer leur dimension temporelle. On obtient ainsi des impulsions dont l'énergie est passée de quelques nanojoules à 800 millijoules. L'énergie a donc été multipliée par un facteur de  $10^8$ .

#### 5. Le compresseur

Il est formé, dans le Téra-mobile, de deux réseaux parallèles qui permettent d'effectuer la transformation inverse de celle de l'étireur.

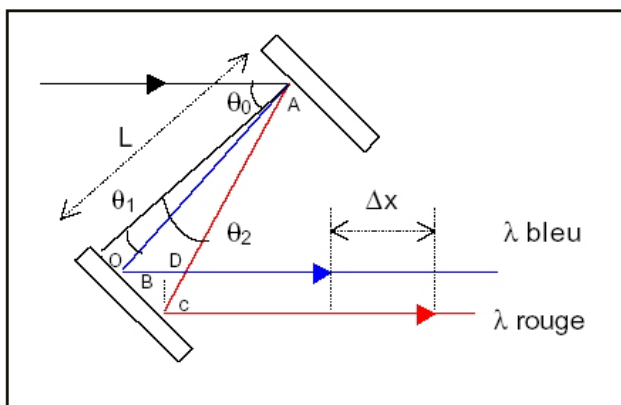


Figure 5 Schéma simplifié pour le calcul.

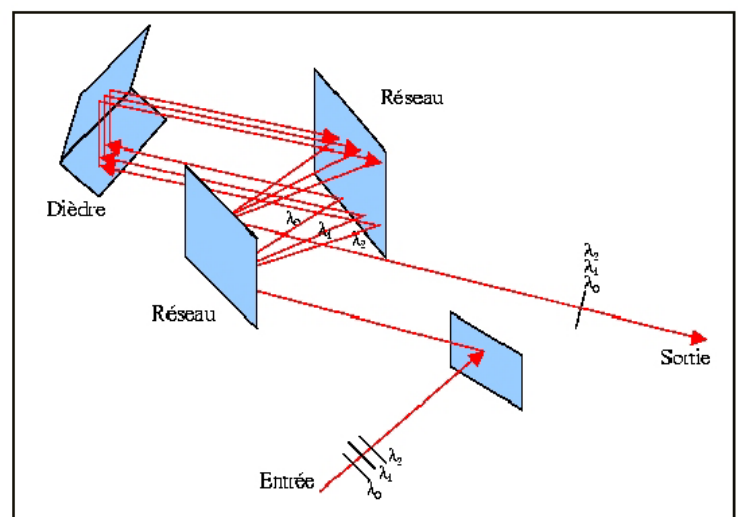


Figure 6 Schéma du compresseur à 2 réseaux

En réalité, comme le montre la figure 5, le faisceau effectue deux passages dans le système composé par les deux réseaux (figure 6), ce qui permet de rendre nulle la distance CD (appelée décalage spectral) tout en conservant la valeur de  $\Delta x$  (impliquant un décalage temporel). Calculons la différence de marche  $\Delta x$  entre deux ondes de longueurs d'onde différentes que l'on appellera pour schématiser  $\lambda_1 = \lambda_{\text{bleu}}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_{\text{rouge}}$  et  $\delta = \Delta x$ .

La différence de marches entre les deux faisceaux sortant du réseau est :

$$\delta_{(\lambda_1 / \lambda_2)} = (AB + BD) - AC$$

$$\text{or on a } \cos \theta_1 = \frac{L}{AB} \text{ et } \cos \theta_2 = \frac{L}{AC}$$

$$\text{et de plus } \tan \theta_1 = \frac{OB}{L} \text{ et } \tan \theta_2 = \frac{OC}{L} \text{ et } \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) = \frac{BD}{BC}$$

$$\text{donc } BD = L(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)$$

$$\text{donc finalement } \delta_{(\lambda_1 / \lambda_2)} = \left(\frac{L}{\cos \theta_1}\right) + L(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) - \left(\frac{L}{\cos \theta_2}\right)$$

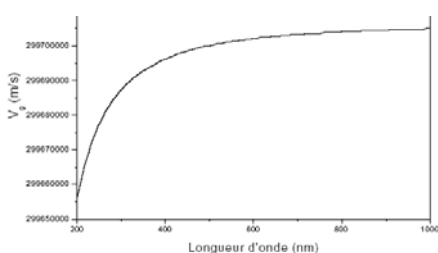
et comme  $\theta_i = \sin \theta_0 + \frac{\lambda}{d}$  avec  $i \in \{1, 2\}$ , il suffit de fixer  $\theta_0$  pour déterminer la valeur de  $\Delta x$ , et donc du décalage temporel existant entre les différentes ondes de la figure 6, afin, comme nous le verrons ci-dessous, de contrôler la filamentation.

*Remarque : Il est possible d'invertir les systèmes optiques constituant l'étireur et le compresseur.*

### c. L'effet Chirp

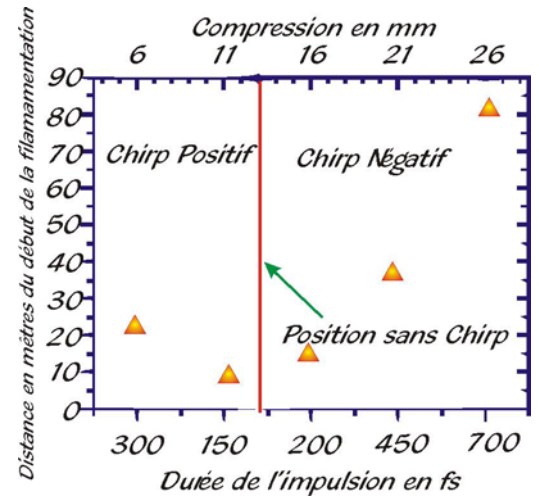
Il peut pour certaines applications de ce type de laser, notamment pour le contrôle de la foudre, s'avérer très utile d'utiliser le compresseur de manière à ce qu'en sortie du Teramobile les grandes longueurs d'onde aient du retard sur les petites. Ce retard sera ensuite compensé par les propriétés de la propagation de la lumière selon lesquelles la célérité des ondes de hautes fréquences est plus élevée que celle des ondes de fréquences moindres. En effet, selon la loi de Cauchy on a :  $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$  avec A et B deux constantes

positives, et  $v=c/n$  donc lorsque  $\lambda$  croît,  $n$  diminue donc  $v$  augmente. On peut ainsi contrôler la distance à laquelle la puissance crête du laser est maximale afin de limiter les risques lors de la capture de la foudre, comme nous le verrons plus tard.



**Figure 7** Vitesse en fonction de la longueur d'onde

Le schéma ci-dessous décrit l'évolution de la distance à laquelle s'initialise le filament en fonction de la longueur de la compression et donne en même temps la durée de l'impulsion. On remarque donc que dans le cas du TéraMobile, pour avoir un effet Chirp négatif, la distance entre les réseaux doit être supérieure à 13 mm.



Distance entre les réseaux en millimètre	6	11	16	21	26
$\tau_0(f_s)$	300	150	200	450	700
Distance du début de la filamentation en mètre	25	8	12	35	80
Longueur du régime Multifilaments en mètre	25	40	>55	>90	>90

**Figure 8 Influence de la compression sur la distance du début de la filamentation**

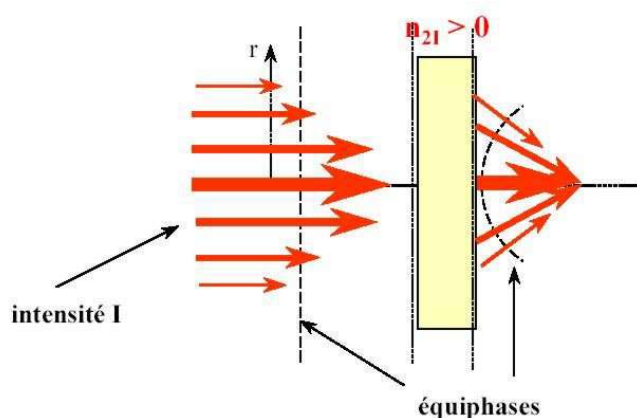
## II. Propagation de l'impulsion générée, équilibre focalisation - défocalisation

### A. Autofocalisation par effet Kerr

Dans le cas d'un laser de haute intensité, l'indice du milieu peut s'exprimer par un développement en série de Taylor qui prit à l'ordre 1 nous donne  $n = n_0 + n_2 I$ . Or le profil spatial de l'impulsion est gaussien, ce qui implique que l'intensité soit plus élevée au centre du faisceau que sur les bords, il en est donc de même pour l'indice du milieu  $n$ . La

vitesse de phase étant définie par  $v_\varphi = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$  (avec  $c$  célérité de la lumière dans le vide et

$n$  indice de réfraction du milieu), elle est plus élevée sur les bord qu'au centre, d'où la forme des plans équiphases (cf. schéma). D'après le théorème de Malus, les vecteurs d'ondes sont orthogonaux aux plans équiphases, on peut donc assimiler ce phénomène à l'action d'une lentille convergente :

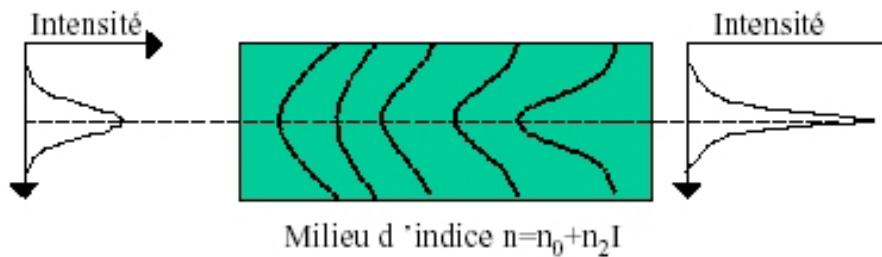


**Figure 9**  
Description  
schématique  
de l'effet Kerr

$$n = n_0 + n_2 I(r)$$



On peut voir dans le schéma suivant le profil d'intensité du faisceau ainsi que l'évolution du front d'onde avec le temps.



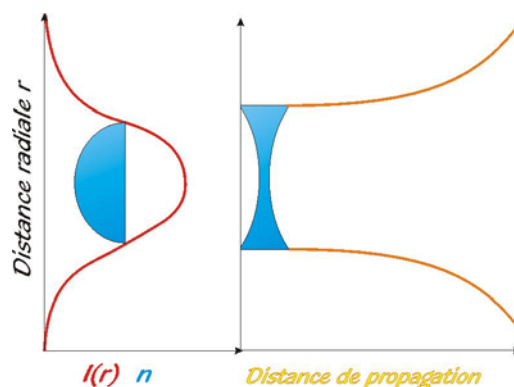
**Figure 10 Influence de l'intensité sur le front**

### B. Phénomènes impliqués dans la défocalisation

La défocalisation est due à deux phénomènes distincts : la diffraction naturelle et la variation de l'indice du milieu entraînée par l'ionisation de ce dernier. Les calculs montrent cependant que l'influence de la diffraction naturelle est négligeable devant l'auto focalisation par effet Kerr au delà d'une puissance de quelques gigawatts. La puissance du Teramobile étant de l'ordre du terawatt on ne prend ici en compte que l'équilibre effet Kerr–ionisation de l'air.

On voit d'après la formule  $\Delta n = \frac{-N_e(I)e^2}{2\varepsilon_0 m \omega^2}$  (où  $N_e$  est la densité d'électrons dans le

plasma,  $e$  la charge de l'électron,  $m$  sa masse et  $\omega$  la pulsation du laser) que l'indice de réfraction diminue lorsque la densité de l'électron augmente, ce qui est confirmé par l'allure du graphique suivant.



**Figure 11 Principe de la défocalisation**

### c. Equilibre effet Kerr – ionisation

Ces deux effets vont s'équilibrer pour permettre la canalisation du faisceau. En effet, l'augmentation de l'intensité au centre du faisceau due à l'effet Kerr va permettre l'ionisation du milieu qui entraîne une diminution de l'indice de réfraction de ce dernier. Lorsque la densité du plasma sera assez importante pour que l'indice de réfraction au

centre du faisceau soit inférieur à l'indice au bord du faisceau, on aura selon le même raisonnement que ci-dessus une défocalisation du faisceau. Ce dernier phénomène diminuera à son tour la densité du plasma jusqu'à une valeur

critique pour laquelle l'influence de l'effet Kerr dominera à nouveau l'équilibre. On aboutit

finalement à un faisceau dont le rayon est de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ .

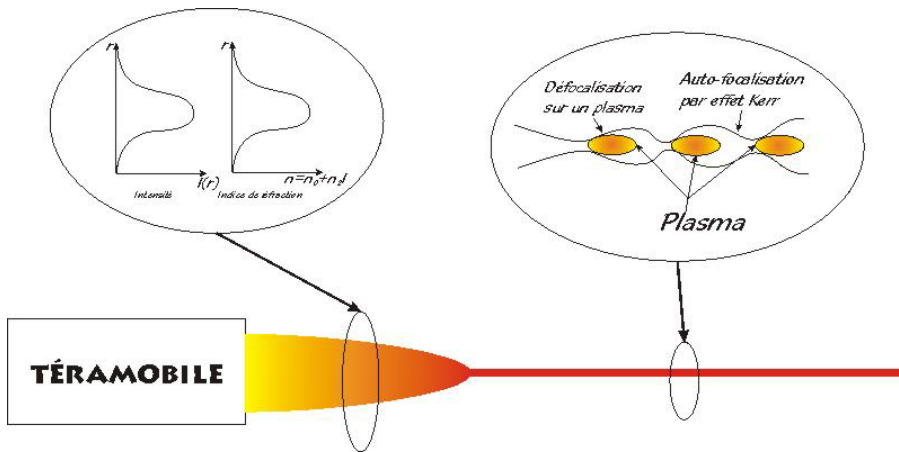


Figure 12 Bilan général de la création du filament

Longueur des filaments	De la dizaine à la centaine de mètres
Diamètre du filament	Environ 100 $\mu\text{m}$
Intensité d'un filament	$I = 10^{14} \text{ W/cm}^2$
Densité du plasma	$N_e = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

### III. Contrôle de la foudre et autres applications

#### A. L'énergie d'ionisation

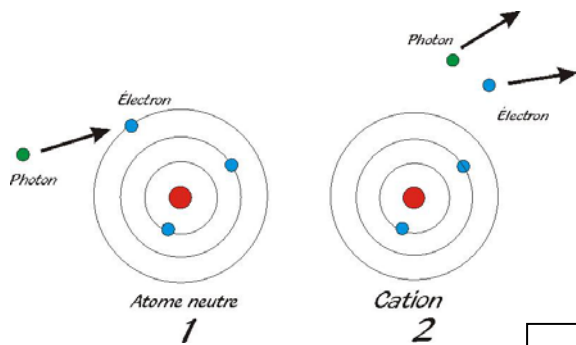
La forte intensité créée par auto-focalisation permet d'ioniser les molécules de O<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>, constituants majoritaires de l'atmosphère (20% de O<sub>2</sub> et 80% de N<sub>2</sub>). Dans les tables, nous pouvons trouver les valeurs de leur potentiel d'ionisation soit respectivement 12,063 eV et 15,576 eV.

D'après la formule  $E = h\nu$ , où h est la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence de l'onde on peut calculer le nombre de photons nécessaires pour ioniser chacune de ces molécules : La longueur d'onde du laser étant de 800 nm, et comme la fréquence de l'onde est caractérisée

par  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , l'énergie apportée par un photon est  $E = \frac{h.c}{\lambda}$  soit

$$E = \frac{6,62559 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{800 \cdot 10^{-9}} = 2,48459 \cdot 10^{-19} \text{ J c'est-à-dire } 1,55287 \text{ eV.}$$

Ainsi, comme  $\frac{12,063}{1,55287} = 7,7682$ , il faudra 8 photons pour ioniser O2 et de la même



manière il faudra 11 photons pour ioniser N2.

Si on considère un atome, les électrons en orbite autour du noyau sont arrachés par des photons apportés par le laser. On obtient alors des cations qui forment le plasma.

Figure 13 Ionisation d'un atome par bombardement photonique

## B. Comparaison : nature - TéraMobile

### 1. Déclenchement classique de la foudre

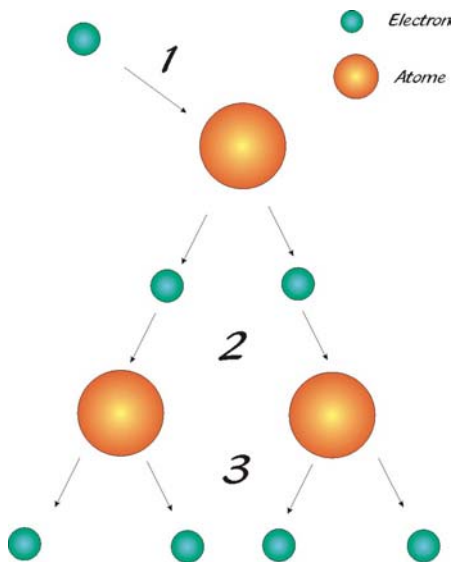


Figure 14 Schéma de l'effet d'avalanche

Durant les instants précédant le coup de foudre, l'ionisation due au bombardement photonique étudiée ci-dessus est négligeable devant un autre phénomène d'ionisation appelé effet d'avalanche.

Considérons un électron libre (1) placé dans un champ électrique important tel que celui régnant entre les nuages et le sol lors d'un orage (de l'ordre de la dizaine de kV/cm). Il acquiert alors une énergie cinétique qui permettra lors de la collision (2) avec un atome neutre de l'air l'arrachement à ce dernier d'un électron. Celui-ci ionisera à son tour un autre atome (3), c'est l'effet boule de neige... Le canal ionisé ainsi créé porte le nom de

traceur. La foudre suit le traceur formé au niveau des nuages et se propage jusqu'à un traceur qui prend naissance au niveau de la Terre. C'est ce canal que l'on essaie de reproduire artificiellement à l'aide du TéraMobile.

### 2. Déclenchement artificiel de la foudre par le TéraMobile

Des expériences, réalisées en laboratoire, mettant en jeu des électrodes chargées séparées d'une distance suffisante pour qu'il n'y ait pas de décharges entre elles, montrent l'intérêt d'un guidage par laser de la foudre.

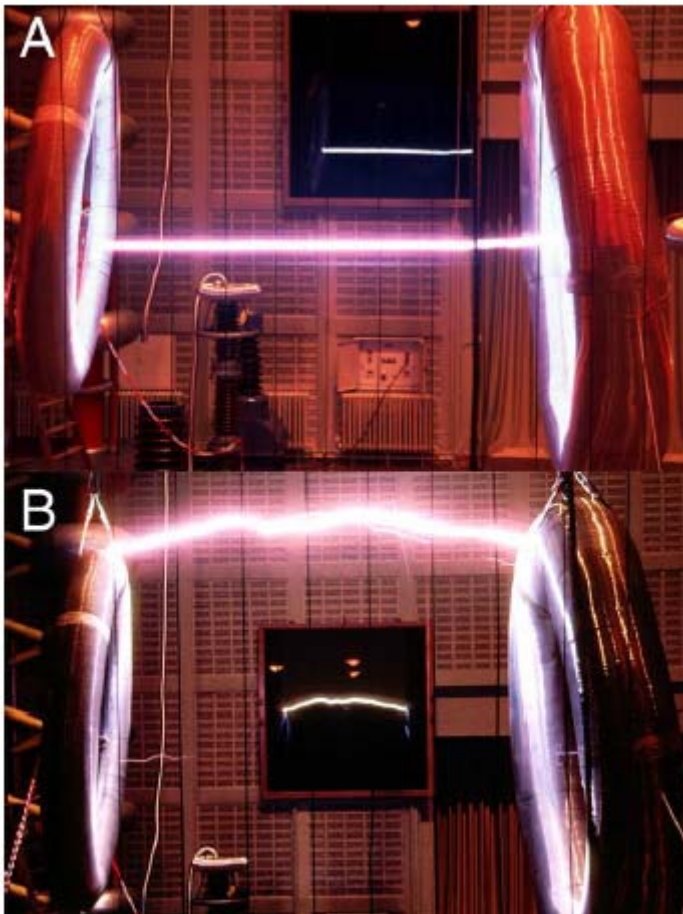


**Figure 15 Générateur de 2 MV, Berlin**

Pour réaliser cette expérience il est nécessaire de reproduire un nuage extrêmement chargé en électricité. Pour cela, on utilise un générateur très haute tension (*figure 13*) qui délivre une tension de 2 millions de volts. Ce dernier charge une électrode qui représente le nuage, l'autre électrode représentant la terre munie en son centre d'un paratonnerre.

La photo B (*figure 14*) présente une décharge

entre les électrodes, sans laser. On remarque alors que le trajet n'est pas rectiligne. La



foudre se propage ici, comme à l'état naturel, empruntant un chemin ionisé aléatoire : elle peut partir de n'importe quel endroit du nuage et peut toucher n'importe quel point de la Terre.

La photo A présente la même expérience avec un guidage laser. Celui-ci traverse la première électrode en son centre et est dirigé vers le paratonnerre. Le trajet est ici parfaitement rectiligne, guidé par le laser, l'expérience est donc concluante.

**Figure 16 Influence du laser sur la trajectoire de la foudre**

### c. Enjeux et limites

#### 1. En pratique

Nous pouvons imaginer un système grandeur nature permettant de déclencher la foudre. Il faudrait pour cela un laser tel que le TéraMobile et un radar météorologique. Ce dernier permettrait de détecter le nuage chargé afin d'orienter grâce à un miroir de guidage le faisceau laser sur le nuage. On peut noter la nécessité de l'effet chirp qui permet d'initier la filamentation au niveau du paratonnerre. Actuellement la distance maximale entre le laser et le paratonnerre est de 80 mètres.

L'enjeu de ce projet est multiple : protéger les sites sensibles susceptibles d'être détruit par la foudre (comme les lignes hautes tensions, centrales électriques...), mais également limiter les smogs électromagnétiques. Il faut en effet noter que lorsque la foudre s'abat, elle provoque une perturbation magnétique capable de détruire les circuits électroniques et donc par exemple tout un réseau informatique en hôpital...

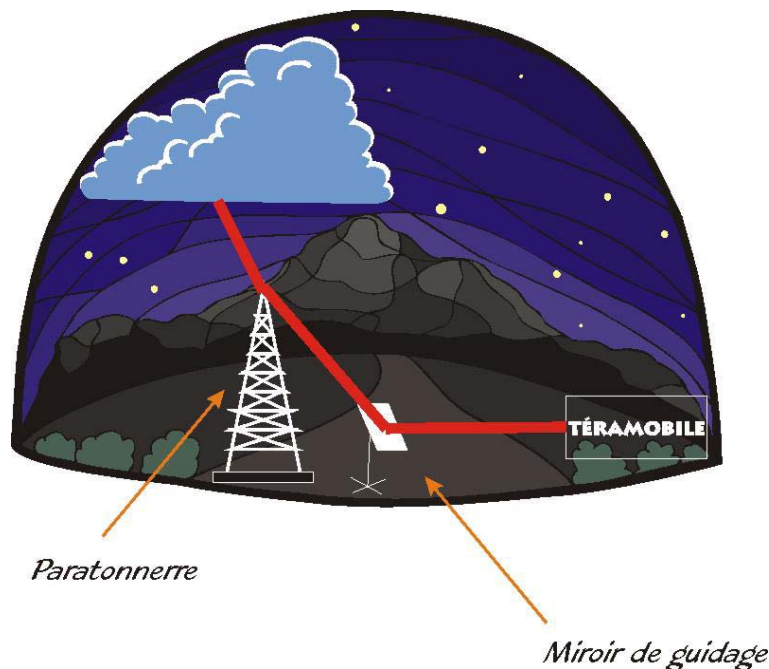


Figure 17 Situation expérimentale grandeur nature

#### 2. Les limites du projet

Lors de notre voyage à Lyon, J. Kasparian nous a fait part des limites actuelles du projet. En effet en ce qui concerne la filamentation, le plasma n'a pas atteint expérimentalement une distance supérieure à quelques centaines de mètres. De plus, la propagation du laser dans les nuages est en cours d'étude mais n'est pas encore maîtrisée. Enfin, le coût d'une

campagne expérimentale implique que les résultats soient assurés, c'est pourquoi l'étude n'a été faite pour l'instant qu'à l'échelle du laboratoire.

*Même si la propagation non linéaire des faisceaux lasers ultra intenses n'est pas encore totalement maîtrisée, les chercheurs avancent à grands pas dans ce domaine. Le Térabile fera d'ailleurs l'objet de campagnes expérimentales en Chine l'année prochaine. L'intérêt de ce projet a déjà été prouvé dans un tout autre domaine : la mesure de la pollution atmosphérique par Lidar.*